

Trabajo Fin de Grado

Registro en color de hologramas de transmisión de objetos difusores en fotopolímero autorrevelable.

Autor

Marina Sevilla Domene

Directores

Jesús Atencia Carrizo

M^a Victoria Collados Collados

Índice

Objetivos	3
1. Introducción teórica	4
1.1 Registro de hologramas.	4
1.2 Tipos de hologramas.	5
1.3 Selectividad cromática en hologramas de volumen de transmisión.	6
1.4 Hologramas en color	8
1.5 Características del material de registro	9
2. Método experimental	10
2.1 Preparación de las muestras.	10
2.2 Montaje experimental.....	10
2.3 Calibración monocromática	11
2.4 Selectividad cromática.	15
2.5 Calibración policromática.....	17
3. Conclusiones.....	22
Bibliografía	24

Objetivos

El objetivo de este trabajo es caracterizar el fotopolímero Bayfol® HX200 para el registro de hologramas de volumen de transmisión y fase en color. Los hologramas de transmisión no pueden reconstruirse adecuadamente utilizando luz blanca, pero pueden usarse con iluminación láser para el registro de hologramas imagen a partir de ellos. En este trabajo se emplean tres fuentes de luz monocromáticas cuyas longitudes de onda son: 442 nm , 532 nm y 633 nm .

En la primera parte se hace una introducción teórica al registro de hologramas así como una clasificación de éstos. Se muestra el modelo teórico para el cálculo de la eficiencia. También se explica una pequeña introducción a la holografía en color y las características del material de exposición.

En la segunda parte se expone el método experimental seguido durante el desarrollo del trabajo. Se detalla el montaje experimental con el cual se ha trabajado explicando sus características. Tras esto se realiza la calibración monocromática, obteniendo los valores de la exposición para los cuales se alcanza la eficiencia máxima en cada una de las redes. Para la formación de hologramas en color es necesario llevar a cabo una calibración policromática mediante la exposición simultánea de los tres láseres. Para ésta se seguirá el método de exposición simultánea con distinto tiempo de exposición.

Por último, el tercer apartado muestra las conclusiones obtenidas tras el desarrollo del trabajo.

1. Introducción teórica

1.1 Registro de hologramas.

La holografía nace de la mano del físico Dennis Gabor en 1948 cuando propone registrar en un medio fotosensible la amplitud y fase de una onda difractada por un objeto. Para ello registra en el medio la interferencia de la onda objeto con otra onda (onda de referencia). Esta técnica tiene su gran desarrollo a partir de los años 60, con el descubrimiento de los láseres de He-Ne y rubí. Gabor recibe el Premio Nobel de física por su invención en 1971. A diferencia de la fotografía, la imagen del objeto reconstruida a partir de un holograma se percibe como una figura 3D que puede verse desde distintos ángulos. Esto es debido a que la figura de interferencia registrada contiene información tanto de la amplitud como de la fase del objeto.

La holografía consta de dos etapas, el registro y la reconstrucción. En el registro intervienen dos ondas, la onda objeto y la de referencia, cuyas amplitudes complejas son, respectivamente [1]:

$$\begin{aligned} U_o(x, y) &= A_o e^{-i\phi(x, y)} \\ U_r(x, y) &= A_r e^{-i\varphi(x, y)} \end{aligned} \quad (1)$$

La amplitud compleja en cada punto del holograma es la suma de las amplitudes de ambas ondas:

$$U(x, y) = U_o(x, y) + U_r(x, y) = A_o e^{-i\phi(x, y)} + A_r e^{-i\varphi(x, y)} \quad (2)$$

Por tanto, la intensidad que registra el medio fotosensible vendrá dada por:

$$\begin{aligned} I(x, y) &= U(x, y)U(x, y)^* = U_o U_o^* + U_r U_r^* + U_o U_r^* + U_r U_o^* \\ &= A_o^2 + A_r^2 + A_o A_r e^{-i\phi} e^{i\varphi} + A_o A_r e^{i\phi} e^{-i\varphi} \\ &= A_o^2 + A_r^2 + 2A_o A_r \cos[\phi(x, y) - \varphi(x, y)] \end{aligned} \quad (3)$$

Se obtiene una dependencia armónica de la intensidad con la diferencia de fase entre las dos ondas que interfieren. Esta variación de la intensidad produce que la transmitancia del medio fotosensible una vez procesado también varíe de un punto a otro. Suponiendo que A_r^2 es uniforme sobre la placa, y que la transmitancia es lineal con la exposición, la expresión de la transmitancia es:

$$\tau(x, y) = \tau_0 + \gamma[A_o^2 + 2A_o A_r \cos[\phi(x, y) - \varphi(x, y)]] \quad (4)$$

donde τ_0 es una transmitancia uniforme debida a la exposición constante de la onda de referencia y γ es la pendiente de la curva de transmitancia frente a la exposición en la región lineal.

En la fase de reconstrucción se ilumina el holograma con una onda igual a la onda de referencia. La amplitud a la salida del holograma será:

$$\begin{aligned} U_i(x, y) &= U_r \tau_r(x, y) \\ &= (\tau_0 + \gamma A_o^2) A_r e^{-i\varphi} + \gamma A_o A_r^2 e^{-i\phi(x, y)} + \gamma A_o A_r^2 e^{i\phi(x, y)} e^{-i2\varphi(x, y)} \\ &= U_1(x, y) + U_2(x, y) + U_3(x, y) \end{aligned} \quad (5)$$

$U_1(x, y)$ es una réplica de la onda de referencia y es la onda transmitida por el holograma (orden 0 de difracción), $U_2(x, y)$ es una réplica de la onda objeto (orden +1 de difracción) y, por último, $U_3(x, y)$ es similar a la conjugada de la onda objeto (orden -1 de difracción).

Por tanto, al iluminar el holograma con una onda similar a la onda de referencia, una de las componentes difractadas será una réplica de la onda objeto.

1.2 Tipos de hologramas.

Según la geometría de registro, se pueden clasificar los hologramas en distintos tipos [2]. En la figura 1 se esquematiza la geometría de registro para alguno de ellos, suponiendo una onda plana de referencia y una onda esférica que proviene de un punto S.

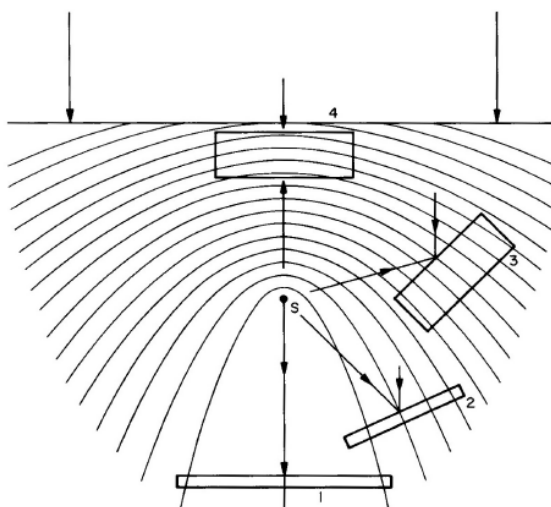


Figura 1: Tipos de hologramas dependiendo de la dirección de incidencia de las ondas objeto y referencia.

1. *Hologramas en línea o de Gabor*: ambas ondas inciden por el mismo lado del material fotosensible y sus vectores de propagación son perpendiculares a éste.
2. *Holograma delgado de transmisión o de Leith-Upatnieks*: en este caso los vectores de propagación están inclinados respecto al material y ambas ondas inciden por el mismo lado.
3. *Holograma de volumen de transmisión*: igual que en el caso anterior pero con un valor de interfranja pequeño frente al espesor del medio.
4. *Holograma de volumen de reflexión o de Lippmann-Bragg*: las ondas inciden por caras opuestas del medio de registro.

La distinción entre holograma delgado o de volumen se hace a partir de la comparación de dos magnitudes, el espesor del medio del material fotosensible (d) y el periodo de la interferencia (Λ).

- *Holograma delgado*: $d \leq \Lambda$. Estos hologramas presentan los tres órdenes de difracción en la reconstrucción (ecuación 5).
- *Holograma de volumen*: $d \gg \Lambda$. Al reconstruir los hologramas de volumen solo aparecen dos órdenes de difracción, el orden 0 correspondiente a U_1 y el orden +1

correspondiente a U_2 (ecuación 5) [1]. En este tipo de hologramas la eficiencia en difracción del orden +1 obtenida teóricamente puede ser del 100%.

Así mismo, según las propiedades del material fotosensible o cómo se procese después del registro, el holograma puede ser de absorción o de fase. En los hologramas de absorción la figura interferencial se registra en el material como variaciones de absorción. En los de fase, en cambio, en el material se producen variaciones del índice de refracción o del espesor.

En este trabajo se van a registrar hologramas de volumen, transmisión y fase para analizar, teórica y experimentalmente, si son adecuados para el registro de hologramas en color.

1.3 Selectividad cromática en hologramas de volumen de transmisión.

Al iluminar un holograma de volumen aparecen dos órdenes de difracción: el orden cero, correspondiente a la onda transmitida, y el orden +1, que corresponde a la onda difractada. La eficiencia del holograma puede definirse de dos formas:

$$\eta_a = \frac{I_{+1}}{I_i} \quad (6)$$

$$\eta = \frac{I_{+1}}{I_{+1} + I_0} \quad (7)$$

η_a se denomina eficiencia absoluta y η , eficiencia relativa. I_i es la intensidad de la onda incidente e I_0 e I_{+1} son, respectivamente, la intensidad del orden 0 y del orden +1 a la salida del holograma.

La eficiencia relativa (η) no tiene en cuenta las pérdidas por reflexión y absorción. Ya que éstas son características del material y no vamos a analizarlas en este trabajo, se va a trabajar con η durante el resto de la memoria.

Una de las principales características de los hologramas de volumen es la selectividad angular y cromática: para cada longitud de onda se obtiene la máxima eficiencia para una determinada dirección de incidencia, determinada por la condición de Bragg [1],

$$2n_0\Lambda \text{sen}\theta_0 = \lambda \quad (8)$$

donde n_0 es el índice medio, Λ es la interfranja (distancia entre planos con índices de refracción iguales) y θ_0 es el semiángulo subtendido entre el haz de referencia y el haz objeto.

La eficiencia cerca de la condición de Bragg viene dada por la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{\text{sen}^2(\sqrt{\nu^2 + \xi^2})}{1 + \xi^2/\nu^2} \quad (9)$$

donde los coeficientes ν y ξ son definidos como:

$$\nu = \frac{\pi n_1 d}{\lambda \sqrt{c_r c_s}} \quad (10)$$

$$(11)$$

$$\xi = \frac{\vartheta d}{2c_s}$$

d es el espesor del material, n_1 la modulación del índice de refracción, c_s el coseno del ángulo de incidencia del haz objeto y c_r el coseno del ángulo del haz de referencia. El valor de n_1 está determinado por la respuesta del material a la exposición, y puede ajustarse experimentalmente para obtener $\eta = 1$, siempre que el material lo permita.

El coeficiente ϑ mide la desviación de la condición de Bragg. Si consideramos iluminación con luz policromática en un rango de longitudes de onda λ alrededor de una longitud de onda λ_0 que cumple la condición de Bragg, ϑ puede expresarse como [1]:

$$\vartheta = \frac{K^2(\lambda_0 - \lambda)}{4\pi n_0}, \quad (12)$$

siendo $K = 2\pi/\Lambda$. En condición de Bragg, $\xi = 0$ y la eficiencia para λ_0 será del 100% si se cumple $\nu = \pi/2$.

En la figura 2 se representan las curvas de dependencia de la eficiencia η con la longitud de onda (selectividad cromática) de hologramas registrados con ángulo entre haces de 50° , cuando la condición de Bragg se cumple para diferentes valores de λ_0 que coinciden con las longitudes de onda de los láseres que se emplearán para el registro y reconstrucción de los hologramas en este trabajo. En dicha figura se observa que los máximos para cada longitud de onda coinciden con zonas de eficiencia muy baja para las otras dos longitudes de onda. Esto nos indica que, al reconstruir con luz monocromática, para cada λ_0 no se reconstruirán el resto de hologramas registrados a otras longitudes de onda, con lo cual se pueden registrar y reproducir con luz láser hologramas de transmisión en color. Este será uno de los objetivos de este trabajo.

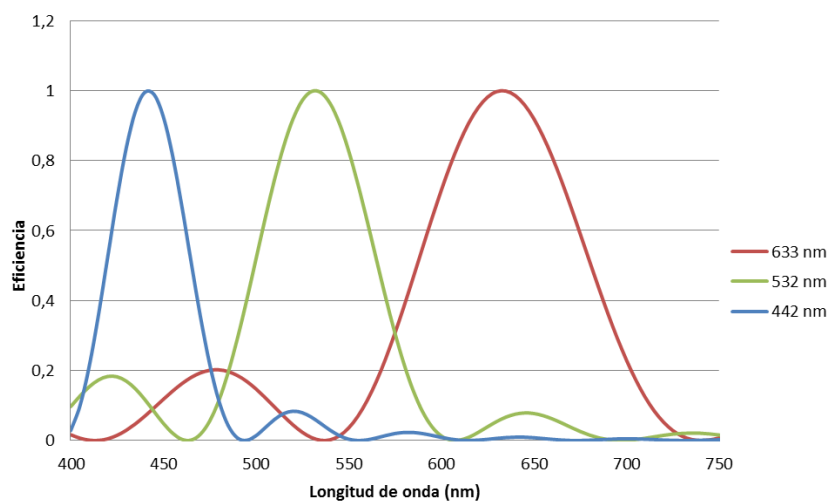


Figura 2: Curvas de selectividad cromática para tres longitudes de onda (633 nm, 532 nm y 442 nm) y para un ángulo de 50° entre haces.

1.4 Hologramas en color

En la introducción teórica se ha hecho referencia al registro y reconstrucción de un holograma con una sola longitud de onda. De esta manera, la información del color del objeto se pierde. Para conseguir registrar en el holograma la información del color del objeto se ha de realizar el registro con, al menos, tres longitudes de onda diferentes [3]. Además, para poder visualizar posteriormente el objeto en color, se ha de iluminar el holograma registrado con luz blanca.

Los hologramas de transmisión no pueden reconstruirse adecuadamente con luz blanca por la gran aberración que presentan, pero iluminados con luz láser pueden utilizarse a su vez para el registro de hologramas imagen, en los cuales sí se puede utilizar luz blanca en la reconstrucción.

Dependiendo de las longitudes de onda elegidas para registrar el holograma es posible reproducir una cierta cantidad de colores. Si se trabaja con tres láseres, situando las tres longitudes de onda seleccionadas en el diagrama cromático CIE 1931 [4] y uniendo tales puntos se obtiene un triángulo, como muestra la figura 3. Los colores encerrados en este triángulo son aquellos que se podrán reproducir. Para conseguir una mayor variedad de colores, con el fin de reproducir de forma más fiel el color del objeto real, el área de este triángulo debe ser la máxima posible dentro del diagrama cromático.

Otra cuestión que se plantea es el número óptimo de láseres a utilizar. Según varios investigadores, tres fuentes monocromáticas son casi siempre insuficientes para preservar con precisión toda la información espectral del objeto [3], y pueden ser necesarias cuatro o cinco longitudes de onda. Sin embargo, incrementar el número de láseres aumenta la complejidad del montaje, así como su coste. En un estudio realizado por Bjelkhagen *et al.* [5] se encuentra que para las tres longitudes de onda 466 nm, 545 nm y 610 nm, el error en la reproducción del color es tolerable. Para el presente trabajo se eligen las tres longitudes de onda más próximas a las óptimas de las que se dispone: un láser de He-Cd de 442 nm, un láser de estado sólido de 532 nm y un láser de He-Ne de 633 nm.

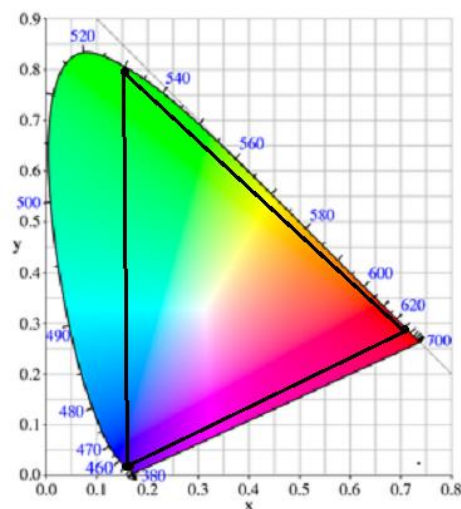


Figura 3: Diagrama CIE 1931 con las longitudes de onda utilizadas en el trabajo. Los colores del interior del triángulo formado serán los que pueden reproducirse.

El material usado para la construcción del holograma también es importante, ya que cambios en el espesor de éste producen desplazamientos en la longitud de onda difractada, dando lugar a un color distinto. El material seleccionado para este trabajo, explicado en el apartado siguiente, no sufre variaciones en su espesor, evitando así este problema.

1.5 Características del material de registro

El material utilizado para el registro holográfico es el fotopolímero Bayfol® HX 200 [6]. Este fotopolímero es auto revelable y puede usarse para registrar hologramas de volumen, tanto de reflexión como de transmisión. El espesor del material no cambia durante el proceso de formación del holograma. En la hoja de especificaciones se detalla que la variación del espesor es menor al 1,4 %, haciendo este material óptimo para el registro de hologramas en color. Es sensible a las longitudes de onda en el rango de 440 *nm* hasta 680 *nm*, tal y como muestra el espectro de transmisión de la figura 4. Las láminas están formadas por dos capas: un substrato de triacetato de celulosa y una capa de fotopolímero de $16 \pm 2 \mu m$ de espesor. Cubriendo el fotopolímero se encuentra una película plástica protectora que hay que retirar antes de exponer.

Como puede observarse en la figura 4, el fotopolímero presenta un máximo de absorción del 85% para 655 *nm*. El segundo máximo de absorción con un 55% se da para 520 *nm* y el mínimo para 570 *nm* con menos de un 30% de absorción. Este espectro de transmisión permite el registro de las tres longitudes de onda de la que se dispone en el laboratorio.

La preparación de las muestras ha de realizarse en una habitación oscura. Para poderla llevar a cabo se utiliza una luz de seguridad con una longitud de onda para la cual el fotopolímero no sea muy sensible, una fuente de luz LED LuxeonRebel LT1012 de 1,02 *W* a 590 *nm*. Para esta longitud de onda la absorción es aproximadamente del 50%. Esta luz debe situarse a más de 50 *cm* del fotopolímero para evitar que el monómero comience a polimerizar.

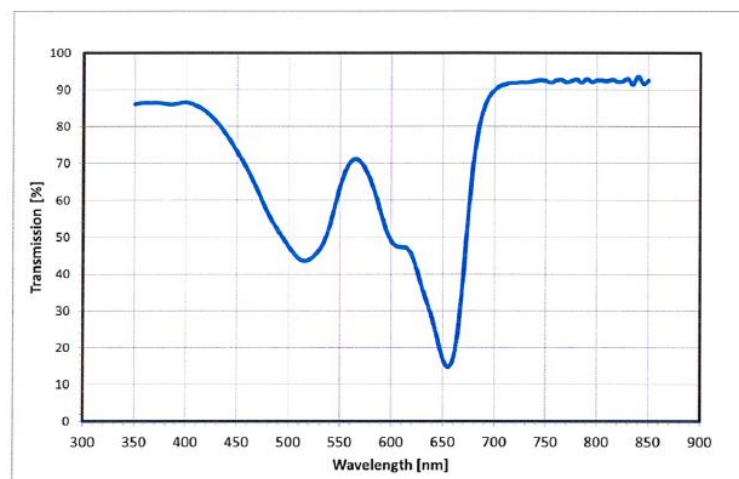


Figura 4: Espectro de transmisión del fotopolímero.

La hoja de especificaciones del material muestra que la máxima modulación del índice de refracción en hologramas de reflexión es $n_1 = 0,037$. Sin embargo, para hologramas de

transmisión, esta modulación es menor debido al mayor espaciado de la red del campo interferencial grabado.

2. Método experimental

2.1 Preparación de las muestras.

Para preparar las muestras usadas en la calibración se recorta la lámina de fotopolímero en rectángulos de, aproximadamente, $4 \times 3 \text{ cm}$. Se retira el protector del fotopolímero y se adhiere éste a un vidrio para una mayor sujeción. Se debe intentar que no queden burbujas ni partículas de polvo entre el vidrio y el fotopolímero, por ello se limpia el vidrio previamente con aire comprimido y se presiona el fotopolímero con un rodillo al pegarlo.

Tras la exposición se debe esperar cinco minutos, tiempo en el que el monómero comienza a polimerizarse en las zonas donde ha recibido suficiente luz. De esta manera se crea un gradiente de concentración de monómero produciendo así una variación del índice de refracción en las distintas zonas de la muestra. Para el fijado del holograma se iluminan las muestras con una lámpara led de luz blanca de 50 W durante 25 minutos. En este proceso se polimeriza el monómero restante y se blanquea el colorante.

2.2 Montaje experimental

En la figura 5 se muestra un esquema del montaje experimental utilizado en el registro. Se utilizan tres láseres con emisión en las longitudes de onda de 442 nm , 532 nm y 632 nm . Los tres haces deben estar perfectamente alineados y son combinados mediante espejos dicróicos. Estos dispositivos están diseñados para reflejar la luz de un determinado intervalo de longitudes de onda y transmitir el resto. De esta manera, como puede verse en la figura 5, primero se combinan los haces rojo y verde con el espejo Chroma T556lpxr con elevada transmitancia para longitudes de onda superiores a 556 nm [7]. Después ambos se combinan con el azul mediante un espejo Chroma T470lpxr, con elevada transmitancia a partir de 470 nm [8]. El haz del láser azul tiene un menor diámetro que el resto, por lo que para aumentar la sección del haz se hace uso de un telescopio de Galileo [9].

Los tres haces pasan a través de unos obturadores que permiten controlar el tiempo de exposición y llegan a un divisor de haz, donde se crean los dos haces necesarios para el registro holográfico. La lámina utilizada transmite un 70% de la luz y refleja el 30%. Esta división en dos haces con distinta intensidad se realiza para facilitar que la relación entre las intensidades del haz objeto y del haz de referencia al llegar al holograma sea de 1 a 10. Se disminuye la intensidad del haz objeto para minimizar los términos de intermodulación producidos por la interferencia de la luz difundida por los distintos puntos del objeto, pero de forma que el contraste en la interferencia entre la luz difundida por cada punto del objeto y el haz de referencia sea mayor de 0,57. El camino óptico recorrido por los dos haces debe ser prácticamente el mismo para asegurar la coherencia.

En ambos haces se coloca un objetivo de microscopio con un pin-hole en el foco para filtrar espacialmente el haz. El objetivo del haz de referencia tiene un aumento $X10$ y el del haz objeto $X4$. Además, como puede observarse en la figura 5, el haz de referencia se colima

colocando una lente de forma que su foco objeto coincida con el foco imagen del objetivo del microscopio.

Como blanco para la calibración se utiliza una lámina de Spectralon® que tiene un comportamiento altamente lambertiano y una reflectancia espectral uniforme [5].

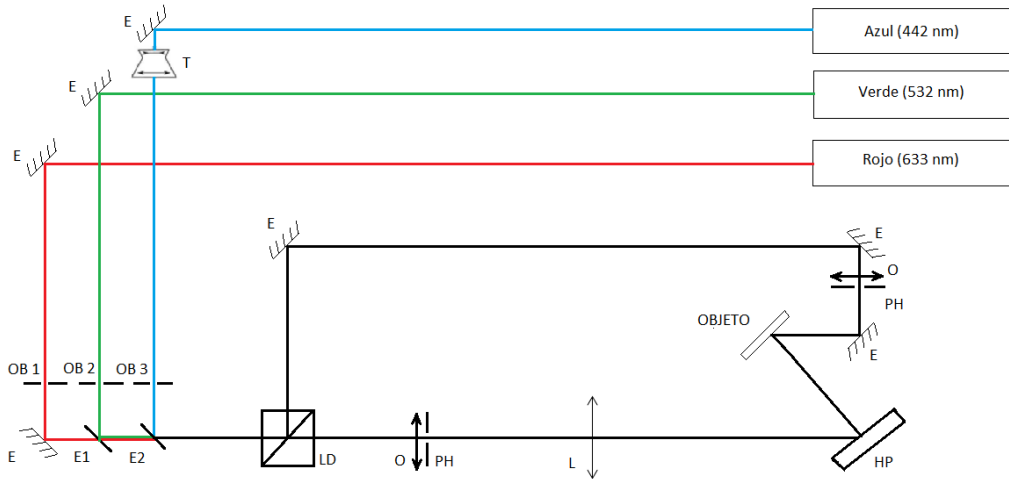


Figura 5: Esquema del montaje. T es el telescopio, E los espejos, E1 y E2 los espejos dicróicos, OB 1, OB 2 y OB 3 los obturadores, LD la lámina divisora, O los objetivos, PH los pin-holes, L la lente y HP la lámina de fotopolímero.

Se busca un ángulo entre haz de referencia y haz objeto que permita que las tres redes registradas sean independientes, tal y como se explica en el apartado 1.3. Se selecciona un ángulo de 50° ya que, como se puede observar en la figura 2, este ángulo entre haces permite que los máximos de difracción correspondientes a cada una de las redes no se solapen.

2.3 Calibración monocromática

El objetivo en la calibración monocromática es obtener la exposición para la cual la eficiencia sea máxima con cada longitud de onda. Para ello se realizan varias exposiciones modificando el tiempo de exposición con cada uno de los láseres.

Como se ha indicado en el apartado 1.3, al definir el modelo teórico, la eficiencia en condición de Bragg ($\xi = 0$) viene determinada por la modulación de índice n_1 en la forma

$$\eta = \text{sen}^2 \left(\frac{\pi n_1 d}{\lambda_\alpha \sqrt{c_r c_s}} \right) \quad (13)$$

La modulación de índice se puede controlar mediante la exposición. En general, y en particular para el material que se utiliza, la modulación sólo es lineal con la exposición para un rango de exposiciones, por encima del cual tiende a saturación para un valor $n_{1,max}$. Teniendo en cuenta esto, consideraremos un modelo teórico para la dependencia de la modulación con la exposición en la forma

$$n_1(E) = n_{1,m\acute{a}x} (1 - e^{-\alpha(E-E_0)}) \quad (14)$$

siendo $n_{1,máx}$ el valor de saturación de n_1 , E_0 el umbral de energía para el cual empieza a crecer n_1 y α es un parámetro que se corresponde con la pendiente de la zona lineal.

Como la dependencia de la eficiencia con n_1 (ecuación 13) es una función seno al cuadrado, la dependencia de η con la exposición puede tomar diversas formas dependiendo del valor de $n_{1,max}$. Si $n_{1,max}$ no es suficiente para conseguir el 100% de eficiencia para la longitud de onda de registro, la dependencia de la eficiencia frente a la exposición es de la forma que muestra la figura 6(a). También puede ser que, si $n_{1,max}$ es mayor que la modulación que se requiere para conseguir el máximo de eficiencia para la longitud de onda de registro, la dependencia de la eficiencia con la exposición sea la que se muestra en la figura 6(b). En este último caso se dice que el holograma está sobremodulado, y se puede obtener eficiencia del 100% para longitudes de onda mayores que la de registro.

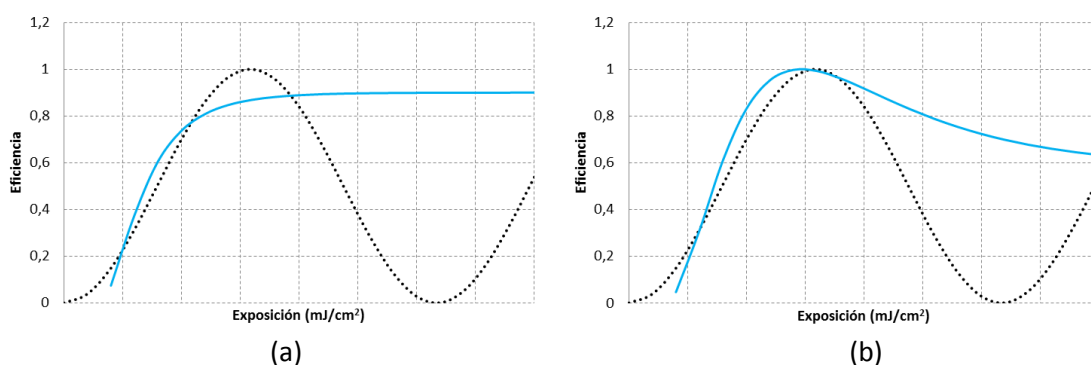


Figura 6: Distintas curvas de la eficiencia dependiendo del valor de n_1 máximo. Con puntos negros se ha representado la función ideal del seno al cuadrado mientras que la curva azul es la obtenida con el ajuste teórico. (a) en el caso de que n_1 máximo no sea suficiente para conseguir el 100% de eficiencia y (b) en caso de sobremodulación.

En nuestro caso, con el fotorpolímero Bayfol, para saber si los hologramas registrados y que presentan eficiencias menores del 100% están sobremodulados, se mide la eficiencia en difracción en función de la longitud de onda con un espectrofotómetro (OCEAN OPTICS USB2000). Si el máximo de eficiencia se obtiene para una longitud de onda mayor que la de registro, el holograma está sobremodulado. Si la eficiencia máxima (aunque no llegue al 100%) se encuentra para la longitud de onda de registro, estaremos en la situación de la figura 6(a). En este caso, la eficiencia no llega al 100% debido a inestabilidades durante el registro que hacen que la figura interferencial se promedie, disminuyendo el contraste y, por tanto, disminuyendo la modulación de índice registrada.

En la figura 7 se muestran los resultados de la calibración para las tres longitudes de onda junto con la curva teórica (ecuación 13) y los parámetros de ajuste.

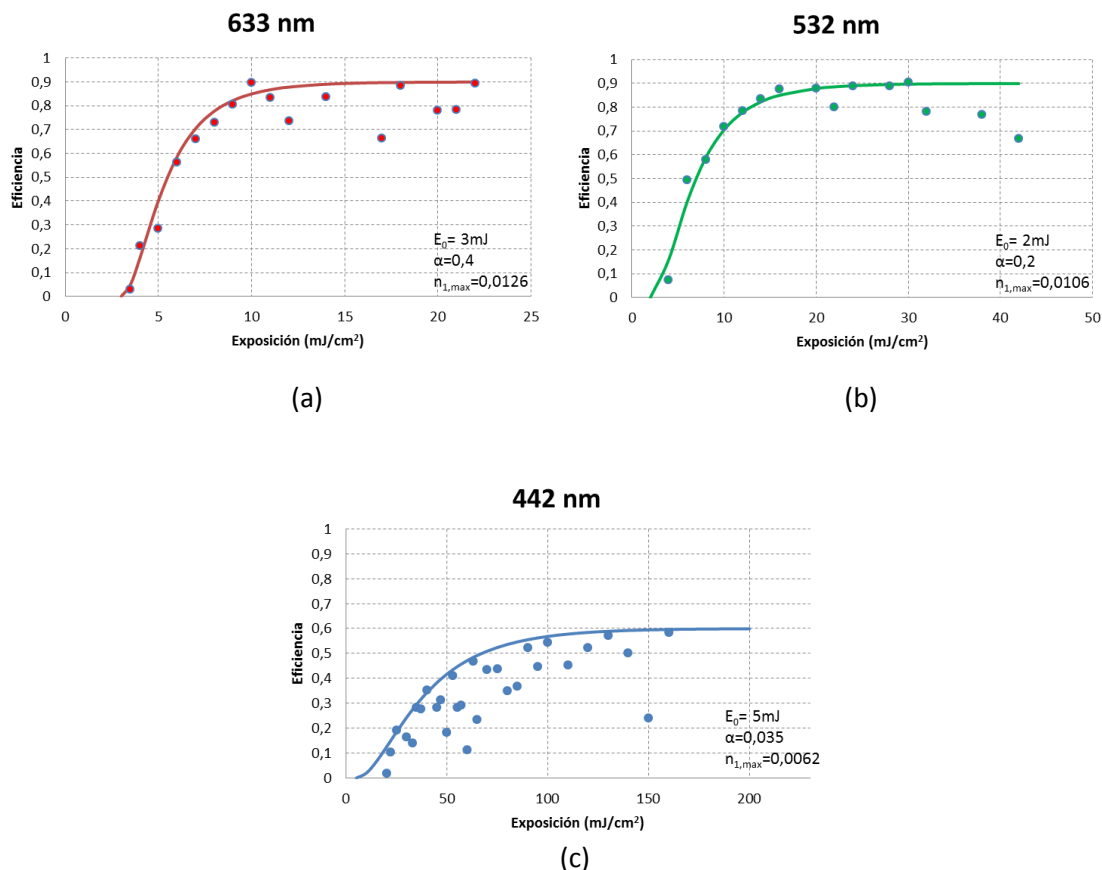


Figura 7: Eficiencias frente a exposición y curva teórica en el registro con cada una de las tres longitudes de onda (a) 633 nm, (b) 532 nm y (c) 442 nm.

Las tres gráficas presentan una exposición umbral por debajo de la cual el monómero no polimeriza y no se forma el holograma. Para realizar el ajuste teórico se ha tenido en cuenta que la curva de eficiencia sigue la dependencia de la figura 6(a), ya que se ha descartado la sobremodulación en cada uno de los hologramas con ayuda del espectrofotómetro.

En las gráficas de la figura 7 se observa que la eficiencia máxima alcanzada tanto con la longitud de onda de 633 nm como con 532 nm es del 90%, mientras que para 442 nm sólo se llega al 60%.

En las primeras pruebas realizadas para la obtención de la curva de calibración para la longitud de onda de 442nm se obtenían eficiencias muy bajas. Esto era debido al potente ventilador del láser de He-Cd, que producía vibraciones y corrientes de aire que hacían que la figura interferencial creada en el registro se promediase, bajando notablemente la eficiencia. Para evitar estos inconvenientes se aisló el láser azul, colocándolo en una mesa independiente. Esto solucionó en parte los problemas de estabilidad y se consiguieron eficiencias más altas, aunque con una mayor dispersión en los valores de eficiencia obtenidos con esta longitud de onda, tal y como se puede apreciar en la figura 7(c). Esta dispersión también es debida a que los tiempos de exposición son mayores al tener el fotopolímero menor absorción para esta longitud de onda (figura 4).

Para tiempos de exposición largos es más probable que los haces sufran alguna perturbación, disminuyendo el contraste de la interferencia en el registro y, por tanto,

disminuyendo la eficiencia del holograma registrado. Por esto mismo no se han conseguido realizar muestras óptimas para exposiciones mayores a 160 mJ/cm^2 . Sin embargo, la tendencia de la curva de la figura 7(c) muestra una saturación para el 60% de eficiencia.

En las tres calibraciones la eficiencia máxima se consigue con una exposición que tiende asintóticamente a infinito ($E \rightarrow \infty$), por tanto se calcula el valor de la exposición para un 99% de la eficiencia máxima. En la tabla 1 se muestra este valor, así como el valor máximo de la modulación de índice de refracción obtenida con el ajuste teórico.

$\lambda \text{ (nm)}$	$\eta_{\text{max}} \text{ (\%)}$	$E \text{ para } 99\% \eta_{\text{max}} \text{ (mJ/cm}^2\text{)}$	$n_{1\text{max}}$
442	60	147,2	0,0062
532	90	24,2	0,0104
633	90	14,1	0,0125

Tabla 1: Eficiencia relativa máxima, exposición para la cual se consigue el 99% de la eficiencia máxima y modulación del índice de refracción máxima para las tres longitudes de onda.

Con cada longitud de onda se alcanza un máximo de modulación del índice de refracción. En la figura 8 se muestra la dependencia de la modulación de índice con la exposición para cada una de las longitudes de onda, calculada a partir de los valores de eficiencia experimental con la ecuación 13, así como su ajuste teórico calculado con la ecuación 14.

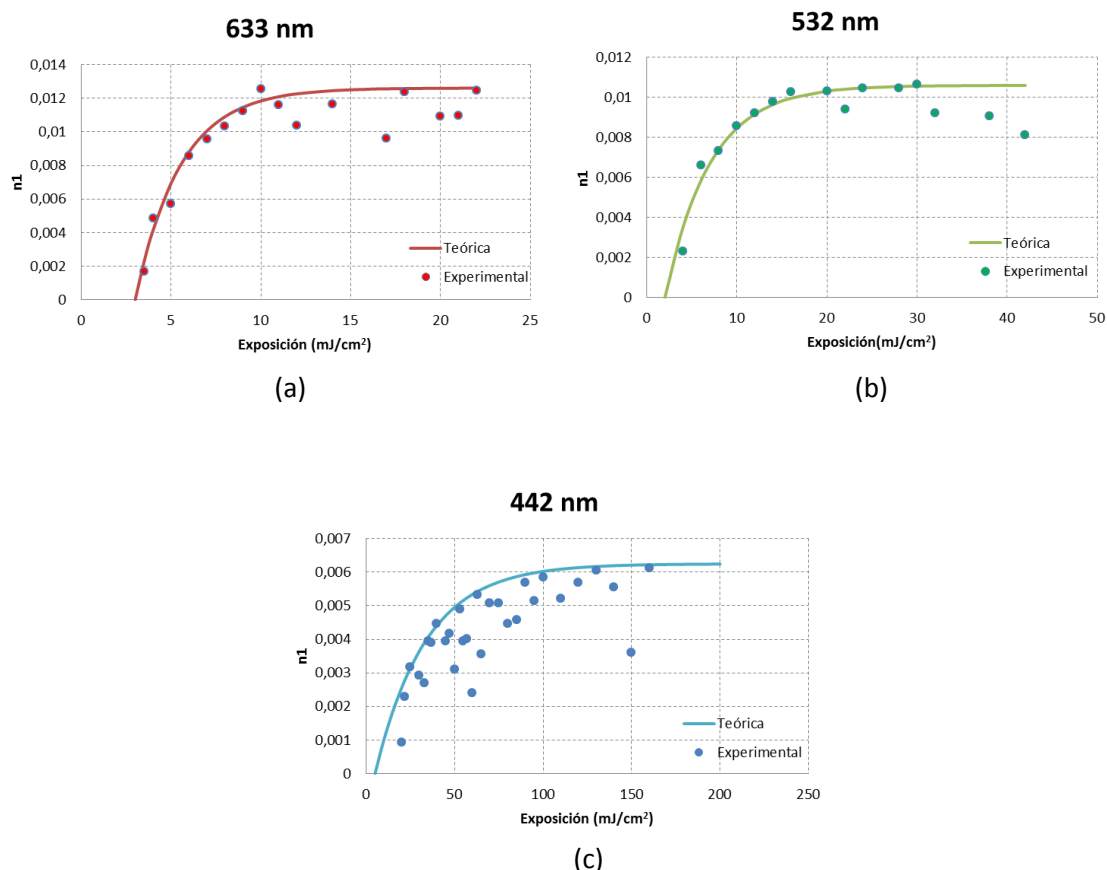


Figura 8: Modulación de índice respecto a la exposición en el registro con cada una de las tres longitudes de onda (a) 633 nm (b) 532 nm y (c) 422 nm.

El valor ideal de la modulación de índice daría una eficiencia del 100%. Sin embargo, como la eficiencia máxima alcanzada experimentalmente es menor, también disminuye respecto del

valor esperado. En la tabla 2 se muestran ambos valores, máximo experimental y máximo esperado si se consiguiera eficiencia del 100%, para cada una de las tres longitudes de onda.

Láser	$n_1(\eta = 1)$	$n_1(\eta_{experimental})$
Azul (442 nm)	0,0111	0,0063
Verde (532 nm)	0,0133	0,0106
Rojo (633 nm)	0,0159	0,0126

Tabla 2: Valores máximos de modulación del índice de refracción para una eficiencia ideal de 100% y el obtenido experimentalmente.

2.4 Selectividad cromática.

Como se explicó anteriormente la selectividad cromática de este tipo de hologramas permite reconstruir, iluminando con una longitud de onda, solamente la componente grabada para esa λ . Es decir, al iluminar un holograma registrado con 633 nm con cualquiera de las otras longitudes de ondas su eficiencia será mínima.

Para comprobar experimentalmente que las curvas de eficiencia frente a longitud de onda no se solapan, como muestra la simulación teórica de la figura 2, se utiliza el espectrofotómetro OCEAN OPTICS USB2000. Con él se mide el espectro del haz transmitido al iluminar con luz blanca en condición de Bragg una de las muestras registradas en la calibración para cada longitud de onda. En concreto, se escogen las muestras con la mayor eficiencia en difracción. En la figura 9 se muestra el espectro del haz difractado para cada una de las tres muestras, calculado a partir del espectro transmitido medido suponiendo que sólo existen el orden 0 y el orden +1 de difracción.

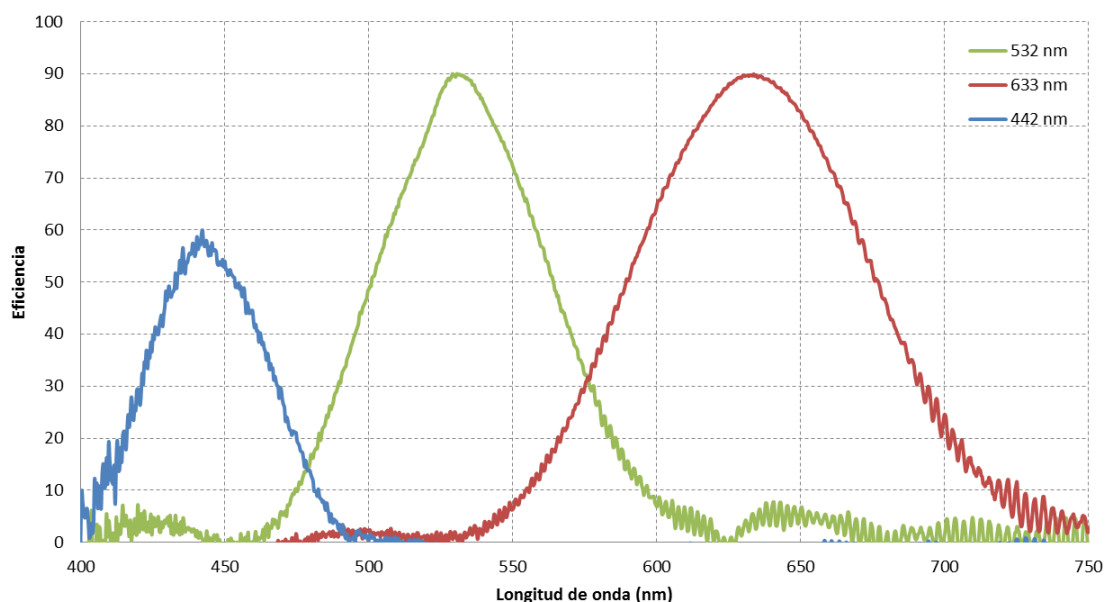


Figura 9: Curvas de selectividad cromática medidas experimentalmente en tres muestras de eficiencia máxima obtenidas en la calibración monocromática de cada una de las longitudes de onda.

En la figura 9 se puede ver cómo los tres máximos no se solapan, es decir, si se registran tres hologramas con las tres longitudes de onda en el mismo material, se comportarán como tres hologramas independientes. En la tabla 3 se muestra la anchura a media altura de los máximos experimentales comparada con la calculada teóricamente (ecuación 9).

Láser	$FWHM_{TEÓRICA} (nm)$	$FWHM_{EXPERIMENTAL} (nm)$
Azul (442 nm)	46,1	48,7
Verde (532 nm)	66,5	68,6
Rojo (633 nm)	93,0	94,2

Tabla 3: Anchura a media altura para cada láser, medidas tanto experimentales como teóricas.

La altura de los máximos en la gráfica experimental (figura 9) es menor que la calculada teóricamente (figura 2) debido a que para el modelo teórico se supuso una eficiencia del 100%, y experimentalmente la eficiencia que se consigue es menor.

Para comprobar que la eficiencia es mínima al reconstruir el holograma con una longitud de onda distinta a la de construcción, se ilumina cada una de las tres muestras utilizadas para obtener los espectros de la figura 9 con los distintos láseres, y se mide el orden +1 y el orden 0 para calcular la eficiencia para cada longitud de onda.

λ registro	633 nm			532 nm			442 nm		
$\lambda_{incidente} (nm)$	633	532	442	633	532	442	633	532	442
Eficiencia	88,3%	8,8%	5,6%	5,2%	87%	8,8%	0,1%	0,9%	58%

Tabla 4: Eficiencia medida cuando cada muestra, registrada con una longitud de onda diferente, se ilumina con cada longitud de onda.

Así al reconstruir la red de 633 nm con una longitud distinta a la de registro la eficiencia es más baja, disminuyendo un 90% al reconstruir con 532 nm y un 93,7 % al reconstruir con 442 nm. La eficiencia de la red de 532 nm disminuye un 94% al reconstruir con 633 nm y un 89,9% al reconstruir con 442 nm. Por último, al reconstruir la red de 442 nm con la longitud de onda 633 nm la eficiencia disminuye un 99,8% y al reconstruir con 532 nm un 98,5%. El hecho de que la eficiencia para otras longitudes de onda distintas de la construcción no sea totalmente cero puede afectar a la reconstrucción e indica que las redes no son totalmente independientes.

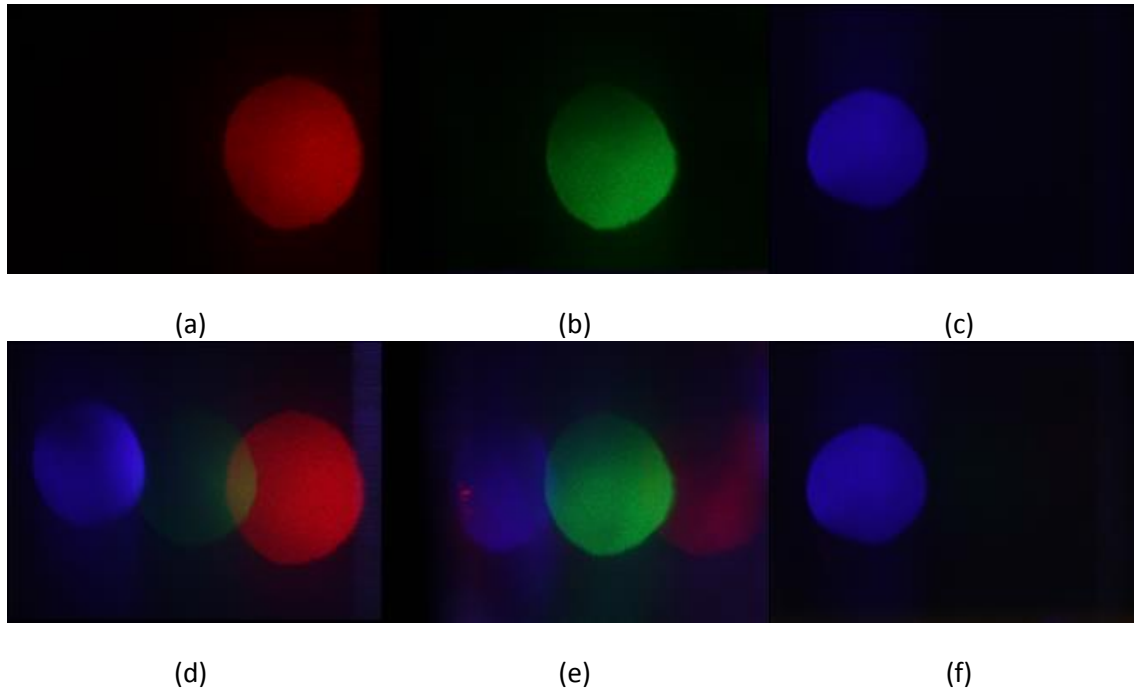


Figura 10: Imágenes de los hologramas registrados con cada longitud de onda, iluminados con la longitud de onda de registro (a) 633nm, (b)532nm y (c)442nm, y reconstruidos con las tres longitudes de onda simultáneamente: (d), (e) y (f).

Se ha fotografiado la imagen del objeto difusor obtenida cuando una muestra del holograma registrado para cada longitud de onda se ilumina con la longitud de onda de registro (figura 10 (a), (b) y (c)).

En las figuras 10(d), 10(e) y 10(f) se muestra la imagen del objeto difusor obtenida con los mismos hologramas, esta vez iluminados en la reconstrucción con las tres longitudes de onda simultáneamente.

Para las redes de 633 nm y 532 nm la eficiencia al reconstruir el holograma con una longitud de onda distinta a la del registro se encuentra alrededor de un 10% de la eficiencia que presentan para la λ de registro (tabla 4), por ello se observan las tres redes. Sin embargo, para la red de 442 nm, la eficiencia al iluminar con 532 nm y 633 nm era el 1% de la alcanzada con la longitud de onda de registro, y como puede verse en la figura 10(f) al iluminar con luz blanca sólo se aprecia la red del 442 nm.

2.5 Calibración policromática.

Para construir hologramas a color es necesario realizar una calibración policromática. En esta se usan simultáneamente los tres láseres, grabando con cada longitud de onda un holograma independiente sobre el mismo material. En este caso la modulación de índice del material se reparte entre los tres hologramas, lo que dará lugar a una eficiencia menor a la conseguida con la calibración monocromática para cada longitud de onda. Para que la reproducción del color del objeto sea lo más fiel posible la eficiencia de los tres hologramas debe ser similar.

Existen varios métodos de registro que pueden llevarse a cabo, algunos de ellos fueron estudiados en trabajos anteriores en el caso de hologramas de reflexión [11]. Uno de ellos es el método de exposición secuencial, en el que se registran en el fotopolímero los tres hologramas

independientemente. Otro método es el de exposición simultánea con mismo tiempo de exposición, en el que se ajustan las intensidades de cada uno de los láseres mediante el uso de filtros neutros de forma que el tiempo de exposición sea el mismo para cada uno de los hologramas, que se registran a la vez. Por último, el método con el que se obtienen los mejores resultados [11], es el de exposición simultánea con distinto tiempo de exposición, que combina los dos métodos anteriores. Por una parte, utiliza filtros neutros para obtener el mismo orden de tiempos de exposición para las tres longitudes de onda y, por otra parte, se ajusta el tiempo de exposición para cada holograma, abriéndose los obturadores a la vez y cerrándose a tiempos distintos.

Utilizaremos este tercer método para registrar hologramas en color en transmisión. Para definir la exposición que se ha de utilizar con cada láser se toman como referencia las obtenidas para alcanzar el 99% de la eficiencia máxima en la calibración monocromática, indicadas en la tabla 1. Se colocan unos filtros de densidad óptica en los láseres de 532 nm y 633 nm para disminuir su intensidad, de forma que el tiempo de exposición sea del mismo orden para las tres longitudes de onda. Es de esperar que sin el uso de filtros en ambos láseres, cuyos tiempos de exposición son notablemente menores que el de 442 nm, estas longitudes de onda actúen más rápidamente en el fotopolímero, haciendo que gran parte del monómero polimerice y alcanzando más modulación de índice, de forma que la modulación de índice que quedase para la red de 442, que tarda más en formarse, sería mucho menor.

La densidad de los filtros a utilizar se calcula de la siguiente manera:

$$D = \log(I_i/I_t) \quad (15)$$

donde I_i es la intensidad incidente sin filtro y I_t la intensidad necesaria para tener unos tiempos de exposición similares para las tres longitudes de onda. Tras la primera prueba se obtienen los resultados que se muestran en la figura 11. En la tabla 5 se muestran los valores de exposición con los que se consiguen las mejores eficiencias en el holograma en color.

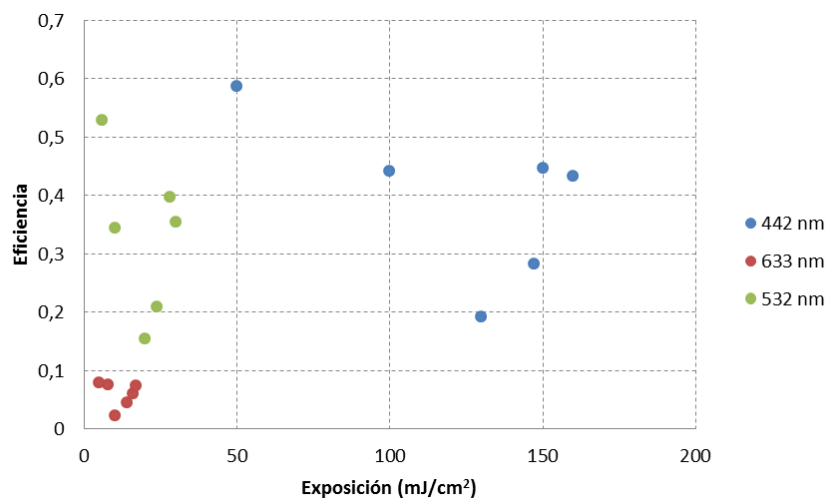


Figura 11: Eficiencias en función de la exposición para la calibración policromática. Filtros neutros tanto en láser de 633 nm (0,3) como en 532 nm (0,8).

λ (nm)	442	532	633
E para $0,99 \eta_{max}$ (mJ/cm^2)	147	14	24
I_i (mW/cm^2)	0,466	0,438	0,079
Densidad óptica	–	0,8	0,3
I_t (mW/cm^2)	0,466	0,076	0,039
E (mJ/cm^2)	50	6	5
η_{max} (%)	58,7%	52,9%	7,9%

Tabla 5: Densidades de los filtros neutros utilizados y eficiencia máxima conseguida para cada longitud de onda con la exposición simultánea y distintos tiempos exposición.

Mientras que para 532 nm y 442 nm se consiguen eficiencias altas, siendo las máximas 52,9% y 58,7% respectivamente, para 633 nm no se obtienen eficiencias mayores al 7,9% en ninguno de los casos. El fotopolímero utilizado necesita un mínimo de intensidad para que el monómero comience a polimerizar. La intensidad del láser de 633 nm es tan baja que es posible que se encuentre cerca de ese mínimo. Por tanto se realiza una segunda prueba quitando el filtro de densidad óptica al láser de 633 nm.

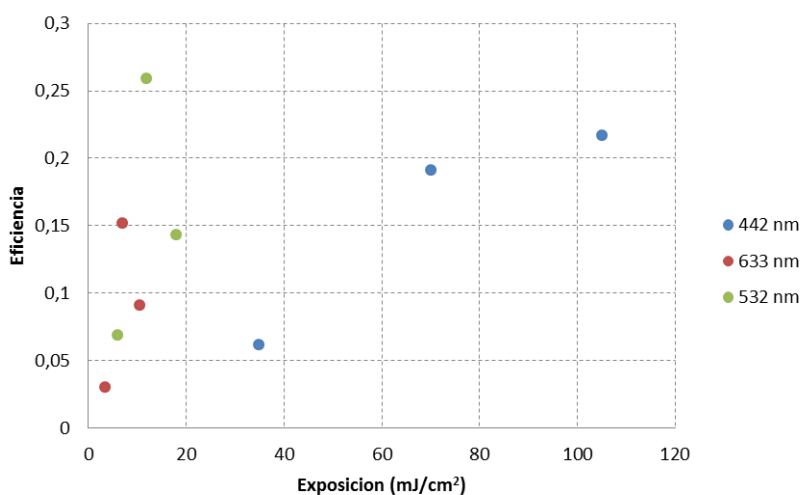


Figura 12: Eficiencia en función de la exposición en la calibración policromática. Filtro neutro de 0,8 en el láser de 532 nm.

Se realizan varios registros variando la exposición (figura 12), aunque manteniendo la proporción entre los valores de la exposición mostrada en la tabla 6. La mejor relación de eficiencia entre los tres haces se obtiene con una exposición correspondiente a la mitad de la necesaria para alcanzar el 99% de eficiencia en la calibración monocromática.

λ (nm)	442	532	633
I_i (mW/cm^2)	0,466	0,438	0,079
Densidad óptica	–	0,8	–
I_t (mW/cm^2)	0,466	0,076	0,079
E (mJ/cm^2)	70	12	7
η_{max} (%)	19,1%	25,9%	15,2%

Tabla 6: Densidades ópticas de los filtros utilizados, exposición para la cual se obtiene mayor eficiencia y eficiencia máxima obtenida para cada una de las tres longitudes de onda.

La eficiencia de la red de 633 nm ha aumentado mientras que las otras dos han disminuido. En este caso la modulación del índice de refracción se reparte más equitativamente entre los

tres hologramas. Aunque sigue habiendo diferencia entre las eficiencias máximas obtenidas para cada longitud de onda, de forma que la reproducción de los colores del objeto puede verse alterada en la reconstrucción al iluminar con luz blanca.

Con el espectrofotómetro se obtiene el espectro transmitido de la muestra registrada con las exposiciones indicadas en la tabla 6. Se pueden observar los tres picos situados en las longitudes de onda de registro, 633 nm, 532 nm y 442 nm.

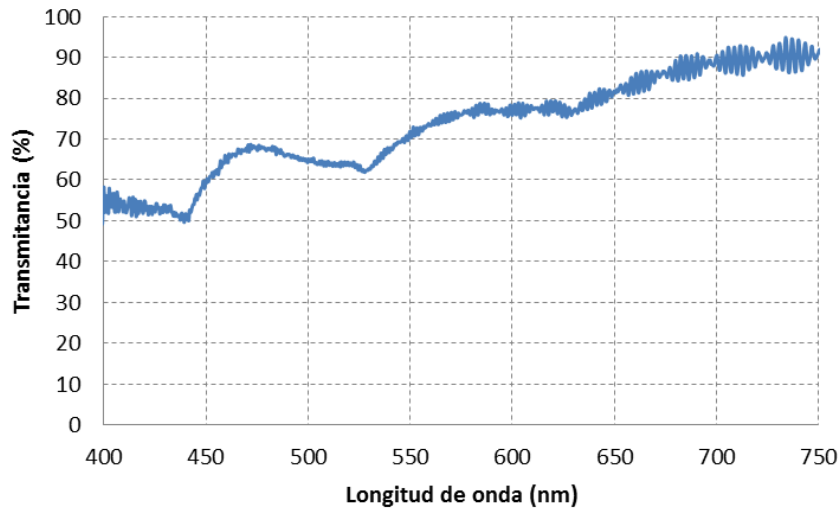


Figura 13: Espectro transmitido de la muestra registrada con las tres longitudes de onda con los datos expuestos en la tabla 6

Al reconstruir con luz blanca la muestra anterior, se espera obtener un único holograma de color blanco. Sin embargo, además de la imagen esperada, se observa la misma figura desplazada lateralmente en ambas direcciones y con distintas tonalidades. Esto parece indicar que, contrariamente a lo que se esperaba que ocurriese al medir la selectividad cromática de las redes individuales, las tres redes no son totalmente independientes, interfiriendo unas con otras y creando distintos hologramas para direcciones diferentes.

En la figura 14 se muestran los hologramas obtenidos al reconstruir la muestra con 633 nm en la figura 14(a), con 532 nm en la figura 14(b), con 442 nm en la figura 14(c) y con luz blanca (figura 14(d)).

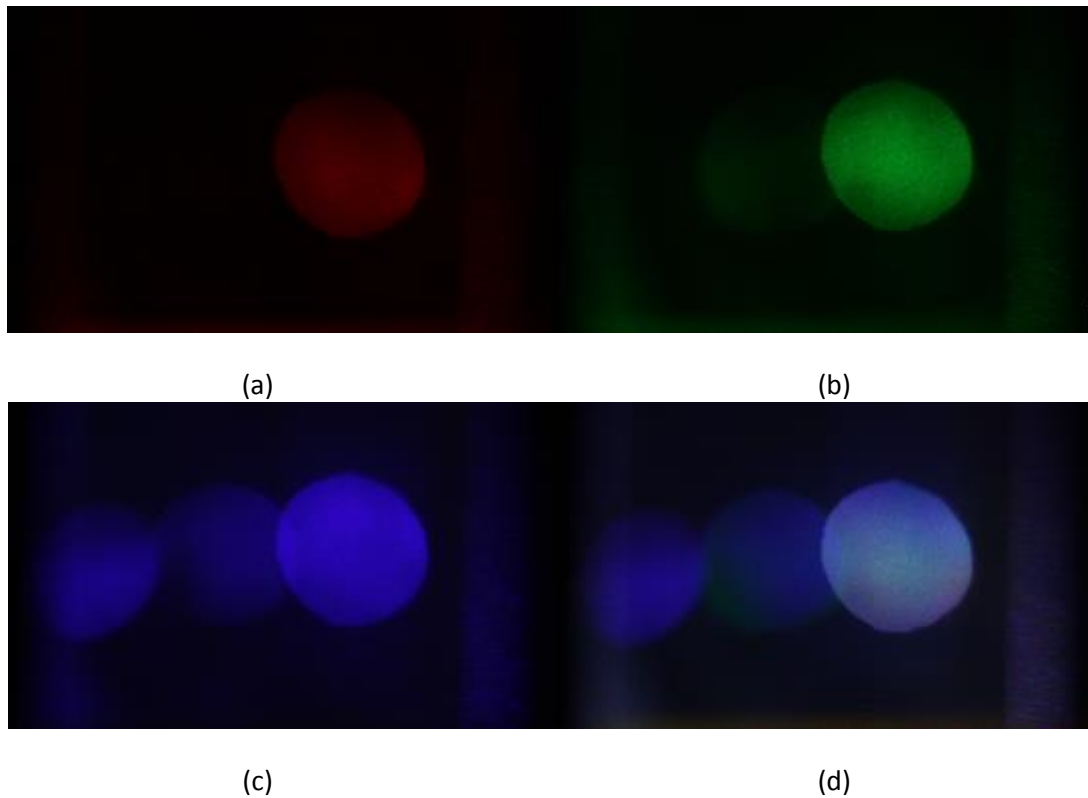


Figura 14: Reconstrucción de la muestra realizada en la calibración policromática reconstruida con 633nm (14(a)), 532nm (14(b)), 442nm (14(c)) y con luz blanca (14(d)).

En la figura 14(d), a pesar de que aparecen imágenes no deseadas debido al acoplamiento de los tres hologramas registrados, se puede comprobar cómo el orden +1 de difracción (imagen de la derecha) reproduce adecuadamente el color blanco del objeto.

Para observar la reproducción de colores se cambia la lámina de Spectralon® por una figura Lego®. Se busca un objeto que contenga los tres colores correspondientes a las longitudes de onda de registro.

Las condiciones del registro, tanto método como valores de exposición, son las mismas que las utilizadas para la muestra de la figura 14. En la figura 15 se puede ver como en este caso los hologramas tampoco son independientes, generándose varias imágenes desplazadas. Además, si bien se observan diferentes colores en la imagen, la reproducción del color no es correcta. Por ello, será necesario continuar con los trabajos para corregir los dos defectos indicados: imágenes múltiples y reproducción cromática.



Figura 15: Comparación del holograma realizado (figura de la izquierda) con el método de exposición simultánea con distinto tiempo de exposición con el objeto real iluminado con los tres láseres (imagen de la derecha).

3. Conclusiones

Durante el desarrollo del trabajo se ha caracterizado el fotopolímero Bayfol HX200 para el registro de hologramas de volumen de transmisión.

En la calibración monocromática del material se han alcanzado eficiencias de 60% para la red de 442 *nm* y 90% para las redes de 532 *nm* y 633 *nm*. Han surgido problemas de estabilidad debido a las vibraciones del láser de 442 *nm*. Esto obligó a modificar el montaje aislando este láser en una mesa independiente.

Se calcula la modulación máxima del índice de refracción para cada red, obteniendo los valores de 0,0063 para 442 *nm*, 0,0106 para 532 *nm* y 0,0126 para 633 *nm*. Estos son menores que los valores máximos teóricos ya que la eficiencia máxima alcanzada no llega al 100%.

La calibración para el registro policromático se realiza con el método de exposición simultánea con distinto tiempo de exposición, ya que con este procedimiento se consiguieron los mejores resultados en el trabajo desarrollado por Irene Vazquez [11]. Las eficiencias máximas alcanzadas con este método se obtienen para unos valores de exposición correspondientes a la mitad de la exposición necesaria para lograr la máxima eficiencia en la calibración monocromática. Para la red de 442 *nm* la eficiencia es del 19,1%, para 532 *nm* es 25,9% y para 633 *nm* es 15,2%.

A pesar de que, tanto los cálculos como la medida experimental de la selectividad cromática en redes monocromáticas indicaban que las redes registradas con los tres láseres simultáneamente podían considerarse independientes, al reconstruir los hologramas registrados se observa que las redes no son independientes e interfieren unas con otras.

Como posibles mejoras para el montaje se propone aislar completamente el montaje para que los haces no se vean afectados por corrientes de aire y vibraciones externas. También

podría ser conveniente modificar el montaje acortando los caminos tanto del haz objeto como del haz referencia.

Para registrar hologramas en los que las tres redes sean independientes sería necesario obtener curvas de selectividad cromática más estrechas, lo que podría conseguirse usando un material de mayor espesor.

Bibliografía

- [1] Iñigo J. Sola, Julia Marín-Sáez, Warein Holgado y Jesús Atencia María-Victoria Collados, "Holographic optical elements to generate achromatic vortices with ultra-short and ultra-intense laser pulses.," in *Vortex dynamics and optical vortices.*: Intech, p. Chapter 8.
- [2] C. B. Burckhardt and L. H. Lin R. J. Collier, *Optical Holography.*: Academic Press, 1971.
- [3] Hans I. Bjelkhagen, *Color holography: its history, state-of-the-art and future.* HOLO 5, Varna, Bulgaria, May 2005.
- [4] J. Casas, *Óptica.*: Librería Pons, 1994.
- [5] H. I. Bjelkhagen and E. Mirlis, "Color holography to produce highly realistic three-dimensional images.," in *Applied Optics.*, 2008, ch. 47, pp. 123-133.
- [6] "Bayfol HX 200 film. Product information.,".
- [7] <https://www.chroma.com/products/parts/t556lpxr>.
- [8] <https://www.chroma.com/products/parts/t470lpxr>.
- [9] https://www.thorlabs.de/newgrouppage9_pf.cfm?guide=10&category_id=43&objectgroup_id=1580.
- [10] Wikipedia contributors. (2017, March) Wikipedia, The free encyclopedia. [Online]. <https://en.wikipedia.org/wiki/Spectralon>
- [11] Irene Vázquez Martín, *Registro en color de hologramas de reflexión de tipo Denisyuk en ftopolímero autorrevelable. (Trabajo de fin de grado).* Universidad de Zaragoza: Facultad de Ciencias, 2016.